

TBM 터널과 NATM 터널의 초 근접시공 사례

이 인 기 ((주)바우컨설팅, 상무이사)

본고에서는 1986.8 ~ 1988.7월중에 시공된 부산지하철 1호선 3단계 건설구간 중 서대신동 로타리에서 괴정국민학교 앞까지 연·경암지역에서의 TBM(Tunnel Boring Machine)으로 시행된 단선터널(7.0m)과 NATM으로 시행한 복선터널의 근접시공에 따른 간벽부 보강설계 내용과 근접부 시공시 예측결과 분석, 지보 Pattern 조정 및 시공 실적 등을 제시하였다.

원설계 내용 분석 결과 지보 Pattern이 현장 지반조건에 비해 과다하였고 TBM 굴진시 Thrust 2500kN(본 기계 기준) 이상인 연암이상의 지반에서는 TBM 굴착으로의 효율성이 있었고, 경암구간에서 병행터널의 간섭영향을 배제하려면 터널간의 중심거리가 터널직경의 2배 이상이 되어야 하며, TBM 단선터널(7.0m)의 일 평균 굴진 길이는 4.6m로 분석되었다.

앞으로 이와 유사한 암층에서의 터널근접 시공 및 TBM 굴착시 본 분석내용이 참고가 되기를 기대하여 본고를 작성하였다.

1. 머리말

오늘날 세계 각국에서 최신 터널 굴착방법 및 굴착기계의 연구에 박차를 가하고 있다. 국내에서도

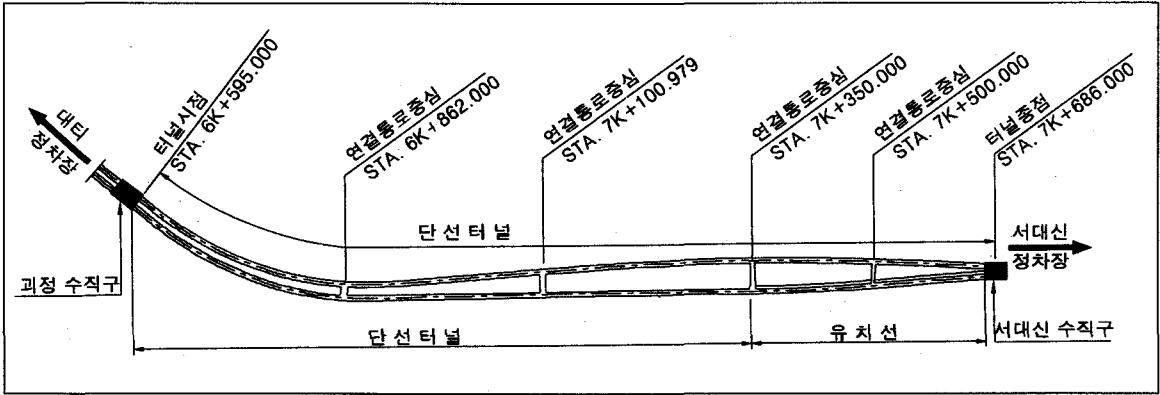
NATM 공법으로 지하철, 도로, 철도, 통신구, 전력구, 수로터널 등 각종 터널에 적용되고 있으며 효율적인 굴착을 하고자 굴착장비의 현대화를 추진하고 있다.

국내에서도 Road-Header, TBM(Tunnel Boring Machine), Shield, Breaker 및 각종 천공기 등 현장 지반조건에 따라 기계화 시공이 증가 추세에 있다. 이 중 본 공구에서 시행된 7m TBM 굴착에 대한 현장조건에 따른 설계변경사항과 근접시공 구간의 시공사례를 소개하고 향후 유사한 지반조건에서 TBM 및 근접시공 구간의 설계 및 시공에 참고가 되어 더욱 안전하고 경제적인 터널건설을 유도하고자 한다.

2. 공사개요

본 공구는 부산지하철 1호선 3단계 공사구간중 부산시 사하구 괴정동 대티정차장과 서대신동 서대신 정차장을 연결하는 구간으로 본선터널 및 수직구 2개소이다.

수직구는 터널 굴착을 위한 전진기지 및 TBM 해체 조립을 위한 작업장으로 사용된 후 지하철 운행시 사용될 전기실, 환기실 및 기계실 구조물 축조를 위한 것으로 대티정차장에서 서대신동쪽으로 66.4m 지점에 지하 30m 깊이의 괴정수직구와 서



(그림 2-1) 평면 개요도

대신 정차장에서 괴정측으로 52.5m 지점에 지하 35m 깊이의 서대수직구 2개소이다.

터널은 주거 밀집지역과 기존 대터터널 및 도로 하부에 지하철 본선인 단선터널 1943m, 유치선인 복선터널 336m와 횡갱 4개소이며 단선터널은 일부구간을 제외하고는 TBM으로 굴착하였고 그 이외의 터널은 발파굴착을 하였다.

3. 지질조건

지반조건은 지표로부터 매립토, 붕적토, 풍화토, 풍화암, 연암, 경암순으로 구성되어 있으며 수직구 주변에서는 풍화암~경암이 출현되고 그 외 대부분 구간은 안산암의 경암으로 구성되어 있다. 주암종은 녹회색 안산암의 경암으로 갱구 주위에서는 균열이 많았지만 심도가 깊어짐에 따라 신선하고 TCR, RQD는 점차 좋아졌으나 5~30m 간격으로 Shear Zone이 출현하고 있다.

이 Shear Zone의 층후는 약 5~30cm 정도이며 심하게 파쇄된 암편과 회백색의 점토분(방해석 풍화토)의 충전물이 존재하여 터널의 안정을 위협하고 있다.

주절리의 방향은 터널축과, 20°, 40°, 90° 방향이 대부분이고 경사각은 70~90° 정도이다. 또 STA.

7k190 지점에서는 안산암질 화산각력암과 치밀한 안산암의 지질경계부가 존재한다.

4. 설계내용

4.1 원설계

원설계에서는 서대신 갱구입구에서 11.5m는 Clamping을 위한 Pilot 터널과 괴정수직구 입구 측은 경암이 출현되는 50m 구간은 상·하 반단면 발파굴착으로 계획하였고 그 이외구간은 TBM 전 단면 굴착을 하도록 하였다.

지보는 슛크리트 t=20cm, 강지보 ctc. 60~80cm의 A-Type과 슛크리트 t=20cm, 강지보 ctc. 1.5m의 B-Type이 있다.

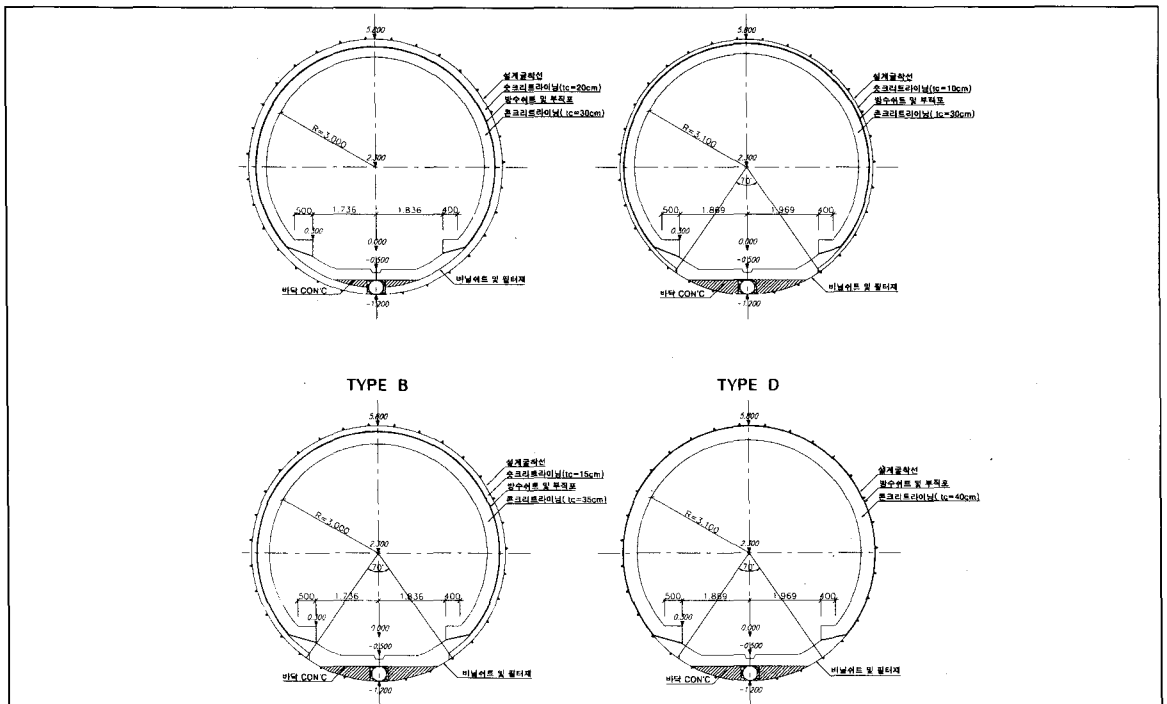
2차 라이닝은 FEM Feed Back 하중과 자중을 고려하여 복철근으로 계획하였으며 복선터널은 11.3m TBM 굴착으로 계획되었다.

4.2 변경설계

터널은 지하에 굴착된 공간 그 자체가 이루는 구조물이기 때문에 터널의 안정은 지반상태에 크게 좌우된다. 따라서 터널의 설계시에는 터널 주변 지반의 상태를 충분히 고려하여야 하며 단면 형상 및 지보 Pattern은 지반의 강도를 최대로 이용할 수

〈표 4-1〉 TBM 굴착 원설계와 변경설계 비교표

공종	원설계		변경설계			
	Type A	Type B	Type A	Type B	Type C	Type D
숏크리트	T=20cm	T=20cm	T=20cm	T=15cm	T=10cm	Shear Zone과 같이 파쇄가 심한 부위에 부분적으로 타설(T=5cm)
감지보강	H-100×100×6×8 ctc.=60~80cm(원형)	H-100×100×6×8 C. T. C=1.5m	H-100×100×6×8 C. T. C=60~80cm	H-100×100×6×8 Invert부 삭제	-	-
Wire Mesh (100×100×6.5)×6.5	Arch, Invert 1겹 축벽 2겹	좌동	좌동	Invert 제외 한구간 1겹	좌동	-
록볼트	∅25 L=5m 4EA	없음	∅25 L=5m 4EA	∅25 L=2m Random Bolt 파쇄가 심한 부위만 시공	좌동	좌동
적용지질	간벽구간	TBM구간의 일반 단면	간벽구간	RQD가 50%이 하로 파쇄절리가 심한 부분에 국 부적으로 실시	RQD가 50~70 으로 비교적 좋 은 지질에 사용	RQD가 70%이 상으로 아주 양호 한 지질에 사용
굴착방법	TBM 굴착					
2차 Lining	철근 Con'c(복철근)			무근 Con'c		



(그림 4-1) Type별 지보패턴도

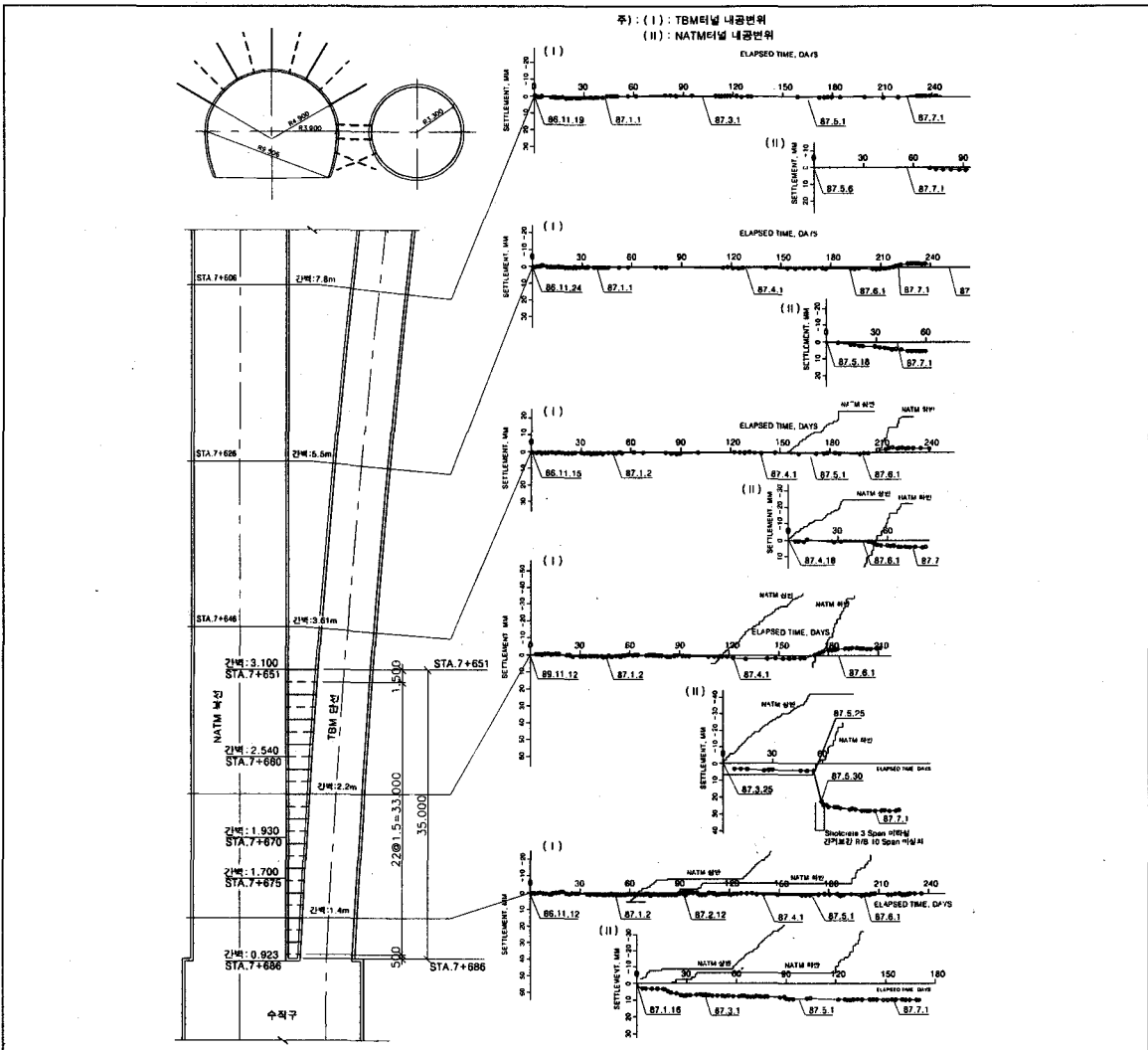
있도록 설계되어야 한다. 따라서 굴착 및 지보재의 시공방법에 관해서도 시공중 원지반의 이완 및 변형을 최소화하기 위해서는 지반조건 및 시간적인 요소들을 충분히 고려하여 적절한 방법을 채택할 필요가 있었다.

시공중 Face Mapping과 계측결과로 보아 지보 Pattern이 너무 과다하다고 판단되어 지보 Pattern의 최소화를 위해 4가지 Type으로 실시하게 되었고, 시공중에 TBM 굴착후 지보시간이

길며 막장과 지보구간의 거리차가 크다는 (즉 무지보구간이 길어짐) 문제점이 있다.

신선한 경암구간에서는 자립시간이 길지만 간혹 약한 부위에서는 자립시간이 짧아 낙반을 유발시키는 사례가 많았다.

복선터널은 11.3m TBM 통과후 후방에서 지보작업이 끝나면 TBM은 후진을 할 수 없기 때문에 괴정과 서대신동 중간지점에서 끝나는 복선터널은 발파굴착으로 변경하여 시공하였다.



(그림 5-1) 간벽구간에서의 내공변위 측정결과

5. 시공현황

5.1 슛크리트 타설시기

TBM 굴착 지보시기에 대하여 원설계에서 1.5m (1 Stock) 굴진 후 슛크리트 타설하는 것으로 되었으나, 슛크리트 타설시 TBM 굴진이 중단되고 TBM Clamping 기기의 Cylinder에 슛크리트 반발재가 묻어 Cylinder내에 흠이 발생하여 Oil 압력이 떨어져 고장이 잦은 문제가 있었다.

스�크리트 타설후 기계를 청소하는데 약 3~4hr 정도 걸려 공사 진행에 차질이 생기며 슛크리트 타설장소도 협소하고 타설 각도가 직각을 이루기 어려워 강도저하 및 반발율이 커지고 있었다.

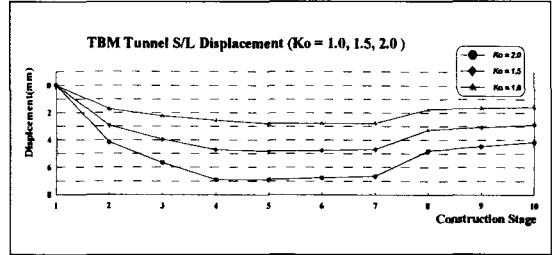
따라서, 계측결과 내공변위 및 천단침하가 1mm 이내로 수렴되는 것이 확인되어 응급을 요하는 경우가 아니면 TBM 후방설비가 완전히 빠져나온 후 약 48m 후방에서 타설토록하여 TBM 굴진이 슛크리트에 의해 중단되는 사례를 줄였고 TBM 상단의 슛크리트 반발재 청소시간을 줄이고 슛크리트의 강도관리 및 반발율을 줄이도록 하였다.

5.2 간벽보강

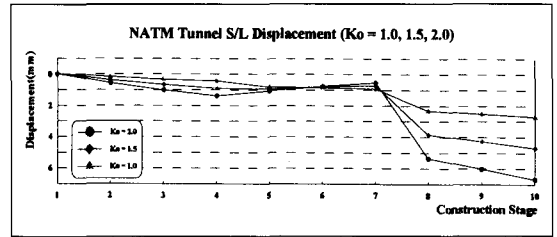
단선과 복선은 서대신갱구에서 간벽두께가 0.923m를 시작하여 괴정측으로 점차 넓어진다. 갱구에서 35m 안으로 들어가서 3.1m의 간벽을 유지하게 되며 80m에서는 7.8m의 간벽을 유지하게 된다.

본 터널에서 계측된 결과중 천단변위는 측량오차로 인해 분석에서 제외하였으며 내공변위 결과만을 분석 비교검토하였다.

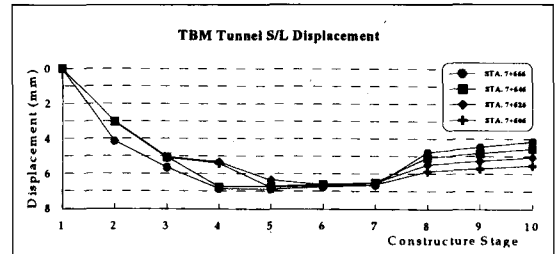
본 비교검토는 계측에서 나타난 TBM 터널의 내공확대에 따른 경향을 파악하기 위하여 실시한 것으로 설계시 적용된 터널수치 해석 지반정수와 동일하게 하였고 축압계수를 1.0, 1.5, 2.0으로 증가시켜 계산한 결과, 계측치와 가장 변위량이 근접한 경우의 축압계수가 2.0으로 추정되었다.(그림 5-2 참조)



(그림 5-2) 축압계수 변화에 대한 TBM 터널측 내공변위



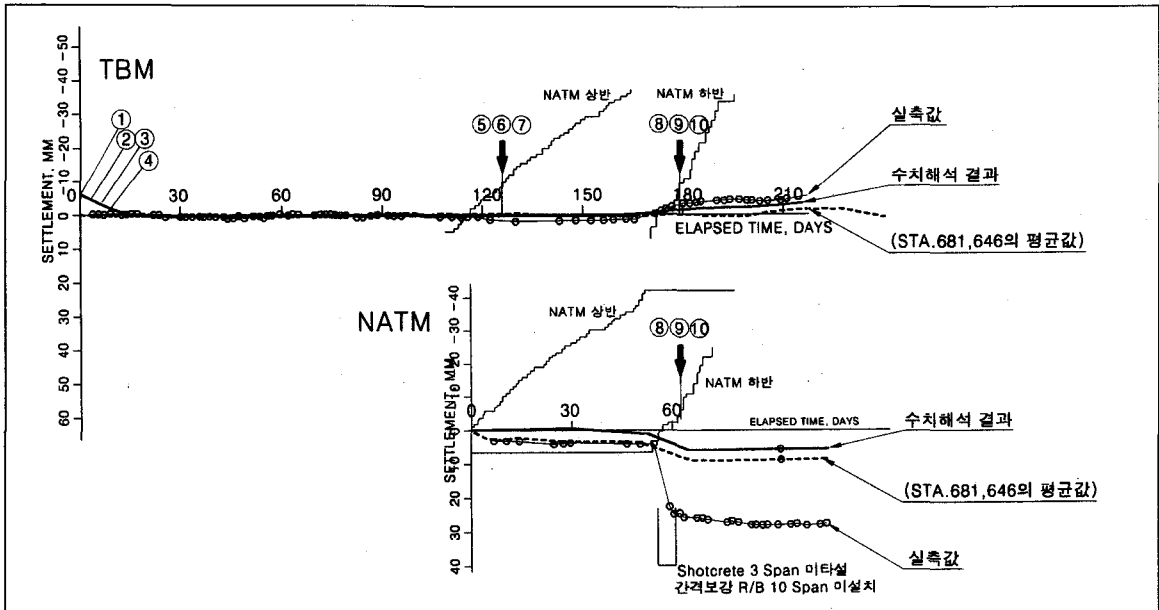
(그림 5-3) 축압계수 변화에 대한 NATM 터널측 내공변위



(그림 5-4) 해석위치별 TBM 터널 내공변위도

〈표 5-1〉 해석순서

해석 단계	시공 순서
1	원지반
2	TBM 굴착
3	TBM 슛크리트 타설
4	TBM 록볼트 설치
5	NATM 상단 굴착
6	NATM 상단 슛크리트 타설
7	NATM 상단 록볼트 설치
8	NATM 하단 굴착
9	NATM 하단 슛크리트 타설
10	NATM 하단 록볼트 설치



(그림 5-5) 계측결과와 해석결과의 합성

따라서 축압계수가 2.0인 경우로 STA. 7+606, 7+626, 7+646, 7+666의 4개단면에 대하여 수치해석을 실시한 결과 간벽이 넓어짐에 따라 TBM터널의 내공 확대가 그림 5-4 처럼 점차 적어짐을 볼 수 있다.

이는 표 5-1 계측결과에서 보여준 바와 같은 양상임을 알 수 있었다.

그림 5-5에서와 같이 TBM 터널 굴착시 초기축정이 늦어져서 TBM 터널에서의 내공변위는 거의 없는 것으로 측정되었으나 실제 약6~7mm의 변위손실이 발생되었다고 추정된다.

그후 NATM 터널 구간 굴착시에서는 해석결과와 계측결과에서 보여준 바와 같이 NATM 터널 상부 반단면 굴착시에는 TBM 터널에 미치는 영향이 미소함을 알 수 있고 NATM 터널 하부반단면 굴착시에는 TBM 터널 내공변위가 급작스런 확장 현상이 일어남을 알 수 있다.

TBM 터널의 내공확장 현상은 간벽이 넓어짐에 따라 변형량은 점차 축소되어 터널 중심간격이 약 17m인 STA. 7k606 이후에는 두 터널의 간섭이

거의 없는 것으로 측정되었다. 이로써 경암지역의 경우도 굴착 후 지보설치가 늦으면 변형이 커지므로 두 터널의 간섭영향을 배제하기 위해서는 표 5-2 병설터널 중심간격의 예와 같이 터널간 중심간격이 2D이상 떨어져야 한다는 결론을 얻을 수 있다.

본 구간에서 이상 변위량 구간의 시공상 참고사항으로는 7k666 지점에서 22m의 변형을 보였다. 이 경우는 숏크리트를 3 Span을 설치하지 않고 강행을 하였던 사례가 있어 변형이 컸던 것으로 판단되고, STA. 7k681 지점에서 간벽이 가장 얇았음에도 불구하고 단선의 영향이 적었던 것은 입구측에서 약 10m 구간은 비석, 발파음 때문에 Breaker에 의한

〈표 5-2〉 병설터널 중심간격

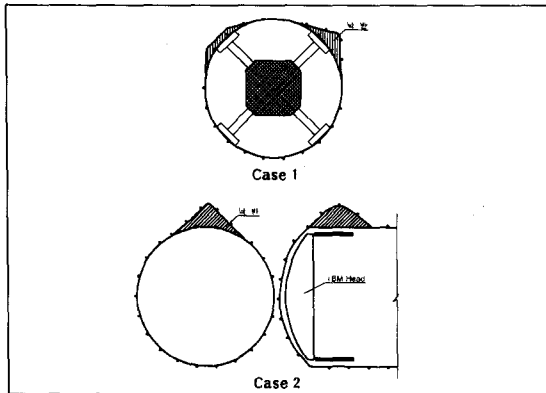
구분	지반조건	간격
터널공사 표준시방서	-원전탄성체	2D
	-연약지반	5D
도로 설계 요령	-일반적인경우	30m
	-원전탄성체	2D
	-연약지반	5D
외국의 경우	-조립의 사질지반	1.5D
	-점착력있는 자갈지반	1.82D
	-점토	6.0D

굴착 작업을 실시하였고 기타구간은 발파를 시행한 때문으로 판단된다.

5.3 낙반현황

TBM 굴진시 낙반이 크고 작은 범위로 수십 차례 발생하였으며 낙반의 종류는 다음과 같이 크게 2가지로 나눌 수 있다.

Case-1 : 굴착시 낙반이 생기지 않았으나 추후

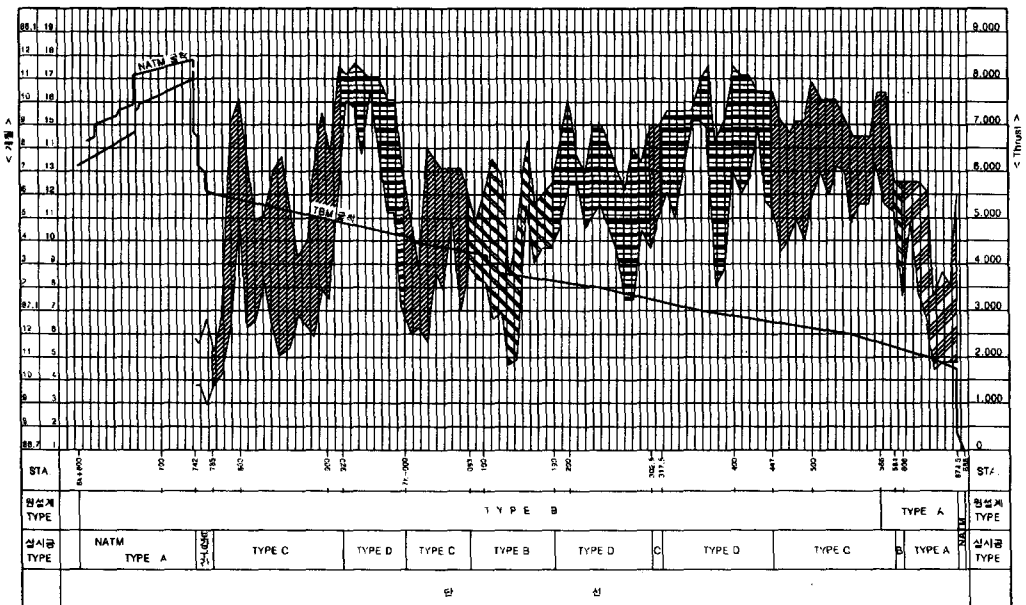


(그림 5-6) TBM 굴착에서 낙반에

앞막장을 굴진하기 위하여 Clamping 압에 의하여 Clamp 위에 Block 형태로 떨어지고 그 크기가 적은대신 TBM Head 후방에서 발생하므로 안전사고의 주요인이 되고 있으며 발생예측은 가능하나 전부를 예측하는 것은 곤란하다.

Case-2 : TBM Head의 종방향 폭이 2.6m이므로 약 2.6m 후방에서 지보가 가능하기 때문에 3.6m 굴진이 되는 동안 Joint를 따라 TBM Head 상에서 발생하며 낙반의 범위가 큰 것이 특징이며 발생예측은 가능하다.

그림 5-7에서 보면 Case-1인 경우에는 TBM의 Thrust가 3000~7000kN 정도에서 Case-2인 경우에는 3000kN이하인 곳에서 발생하였으며 2500kN이하인 경우에는 슛크리트 외에 강지보설치 및 록볼트 등 보강방법이 쓰여지며 낙반처리 및 보강 등으로 굴진속도가 저조하였다. 굴진속도가 저조한 것은 TBM기계가 터널의 중앙을 차지하고 있으므로 중장비의 사용이 불가하여 낙반된 버력과 슛크리트 반발재의 처리를 인력으로 해야하고 슛크리트 타설시 TBM 보호대 설치 및 작업대설치 등



(그림 5-7) TBM굴착시 Thrust 압과 굴진속도와의 관계

많은 시간이 소요되는 것이 원인이었다.

그림 5-7에서 보여준 바와 같이 7k120 부위와 7k020부위에서 공사시간이 많이 소요되었으며 6k760부위에서는 월 가동일수가 15일 이내로 보강에 상당한 시간이 소요되어 약 5개월의 공기가 걸렸다.

각지점에서의 Thrust압이 2500KN 이하정도로 터널 상반부위에 풍화암~연암 경계의 강도를 갖고 있으며 수방향의 Open Joint Set 및 Gouge의 출현이 있었으며 용수상태는 축축히 젖어 물방울이 맺히는 정도였으나 집중용수는 없었다. 이러한 낙반현상은 TBM 굴진 속도를 저하시키고 있다.

그림 5-8에서와 같이 C, D Type 에서는 일 굴진장이 4~6m/일 정도의 발생빈도가 높았으나 B Type에서는 일 굴진장이 1~2m/일 정도의 발생

빈도가 높았다.

이로서 B Type 즉 풍화암~연암 경계부 정도의 암에서 굴진속도가 대단히 느리기 때문에 TBM의 효율성이 떨어진다.

5.4 TBM 가동률

가. Stops Job-Site

그림 5-9에서 나타난바와 같이 작업중지 비율이 42%로 대단히 높다. 이에 포함된 내용은 슛크리트 타설, Car Life 수리, 버력 반출장비의 수리 등 많은 휴지시간이 포함되어 있다.

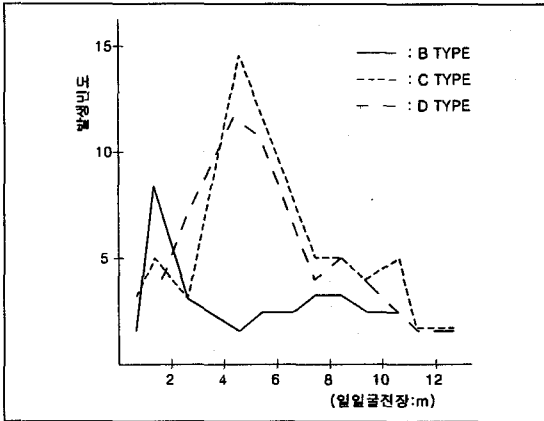
산악터널과는 달리 지하철 터널은 수직구에서 터널이 굴진되어감에 따라 버력 처리에 많은 문제점을 갖고 있다.

수직구는 작업공간의 한계성 때문에 버력을 제 때에 반출하지 못하면 버력이 쌓여 수직구내에서 작업이 불가능 상태까지 가기도 한다.

3-Arch와 복선터널의 공간에 버력을 쌓아놓고 수직구내에 공간을 최대한 이용하여 작업을 하였지만 TBM 버력 크기가 5~15cm 정도로 도로기층재로 활용하면 매우 유익하다고 판단되어 지하철 각 공구로 직접유용을 원칙으로 하였다.

수요·공급이 일치되면 가장 좋은 작업조건이 되지만 수요가 적으면 수직구내에 버력이 쌓여 작업중지 시간이 많아 작업중지 비율이 높았다고 판단된다.

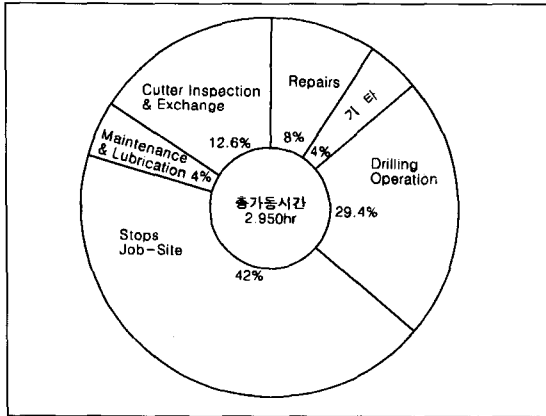
산악터널과 같이 터널갱구가 도로로 직접 연결



(그림 5-8) 지보Type별 일 굴진장 발생빈도

(표 5-3) TBM 월별 가동상황

구분	단위	86년			87년							계
		10월	11월	12월	1월	2월	3월	4월	5월	6월	7월	
가동일수	일	12	22	29	22	19	22	25	26	15	10	203
굴진연장	m	30.1	118	111.8	132.8	96.8	129.1	123.4	17.0	9.2	933.6	
평균일진	m/일	2.32	5.36	5.70	5.08	6.99	4.40	5.16	4.75	1.13	0.92	4.60
총시간	hr	131.08	231.33	356.08	384.75	365.08	398.67	342.17	510.42	212.5	18.5	2950.58
총시간당 굴진장	m/hr	0.23	0.51	0.46	0.29	0.36	0.24	0.38	0.24	0.08	0.50	0.32
굴진시간	hr	32.5	78.83	144.67	120.58	126.17	74	126.67	121.08	27.92	15.17	867.59
굴진시간당 굴진장	m/hr	0.93	1.50	1.14	0.93	1.05	1.31	1.02	1.02	0.61	0.61	1.08



(그림 5-9) TBM 가동률

되는 경우 작업중지 비율을 상당히 줄일 수 있어 본 현장보다 작업효율을 높일 수 있다고 판단된다.

나. Maintenance & Lubrication

기계의 정비 및 주유시간으로 기계작동상 꼭 필요한 시간으로 전체의 약 4%를 차지한다.

다. Cutter Inspection & Exchange

이는 암중, 암의 강도에 따라 변동될 수 있으며 낙반에 의한 비정상적인 작업이 될 경우 Cutter가 마모쪽보다 파손이 되며 Skin Plate등도 파손이 된다. 제일 중요한 것은 막장 전면에 낙반이 생기지 않도록 하는 것이고 이는 Thrust 및 Volume으로 어느 정도 조정이 가능하다.

암의 강도가 수시로 변하는 현장에서는 이 시간이 많아질 것으로 예상된다.

라. Repairs

Belt Conveyor와 각종 전선 등을 수리하는 시간으로 전체의 약 8%를 차지한다.

마. Resetting & Aligning

TBM 장착시간으로 측량이 포함되며 1 Stroke를 Pull로 굴착하면 시간을 약간 단축시킬 수 있으며 본 현장에서는 1Stroke = 1.5m가 최대이며

그 이하의 굴진도 상당수 있었다. 전체 시간중 약 4%를 차지한다.

바. Drilling Operation

순 굴착시간이며 암이 너무 강하거나 약하면 굴착시간이 길어진다. 특히 암이 약한 경우 낙반 등에 의해 Stock Speed를 낼 수 없어 더욱 늦어진다.

표 5-3에서 보여준 바와 같이 87. 6~7월 사이에는 월 굴진 9.2~17m로 매우 느렸다.

이는 이 구간에서의 TBM 굴착은 불가능하다는 것을 증명한 것과 같다.

86.11~87.5월까지지는 비교적 정상작업을 하였고 이때 월평균 가동일수 23.5일 일평균 작업시간 17hr으로 월평균 125m의 굴진을 하였다.

5.5 무지보 구간에서의 방수처리

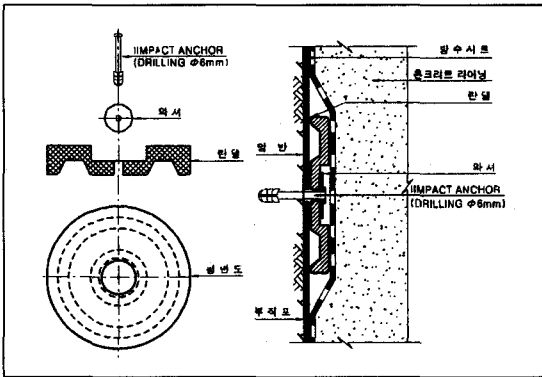
무지보 구간에서 방수슈트 설치시 기존방법인 못을 쏘아 부착하는 방법은 암반상에서는 불가능하다. 그래서 먼저 Fleece위에서 암반으로 6mm 구멍을 뚫고 Impact Anchor를 Hammer로 박아 설치한 뒤 란델 위에 방수슈트를 용접하는 방법으로 시공하였다.

경암터널에서 무지보인 경우 종래 방수처리가 곤란하다는 개념은 Impact Anchor에 의해 가능하므로 발파구간에서 방수를 위해 일률적으로 숏크리트 t=10cm의 시공시 여굴량의 1/2이 숏크리트로 환산되기 때문에 실제 숏크리트의 평균두께는 17.5cm가 설계물량이다.

암질이 양호한 경우 여굴을 숏크리트로 면고르기 식 시공으로 하여도 방수가 가능하므로 굳이 두꺼운 숏크리트를 할 필요는 없다. 다만 굴착면의 요철이 심하여 응력집중 현상이 발생할 소지가 있는 경우 채움 숏크리트만으로 Joint상의 암반 미끌림을 방지시켜 주면 문제는 없을 것으로 판단되고 터널 굴착중 나타나는 Shear Zone이나 일부 파쇄구간에 대해서만 그 지형에 적합한 두께의 숏크리트를 타설하고 Random 록볼트를 설치하여

보강하면 안전하다.

얇은 슛크리트나 불연속 슛크리트는 잘못시공이 되면 암에서 분리되어 떨어져 나오는 경우가 있기 때문에 슛크리트 타설전 물로 암의 Slime을 씻어 내고 타설하는 습성을 갖도록 지도하여야 한다. 상기사항을 TBM 굴착 및 발파가 사용되는 경암터널의 시공시 참고하여 안전하고 경제적인 터널설계 및 시공이 되기 바란다.



(그림 5-10) 암반상에 직접 설치하는 란델 설치도

도록 주의하여야 하고 굴착시 정해진 시공순서 및 보강공법에 의해 시행함과 아울러 계측을 실시, 분석하여 문제점 발생시 즉시 보강에 임하여야 한다.

간벽보강은 보강에 의한 방법과 2-Arch, 3-Arch 터널과 같이 콘크리트로 치환하는 방법이 있으나, 콘크리트로 치환하는 방법은 공사비가 고가이므로 보강방법에 의한 시공이 경제적이라고 판단된다. 따라서 이와 같은 공법에 대한 연구가 체계적으로 되었으면 한다.

참고문헌

1. (주)대우 Engineering, 부산지하철 1호선 3-0공구 FEM 해석 보고서
2. 부산직할시, 부산지하철 1호선 3-0공구 NATM 설계보고서
3. (주)대우 Engineering, 부산지하철 1호선 3-0공구 시공감리보고서

6. 맺음말

대구경 TBM(7.0m이상) 사용시 굴착후 자립 시간이 비교적 긴 연암이상의 절리가 고른 지질에 사용되어야 한다고 판단되며 갱구 주변 및 터널중간 습곡지역의 지질조사는 세밀한 조사계획을 하여 적절한 굴착공법 및 굴착장비를 선정하여야 하며, 버력반출 System은 1일 굴진장을 고려하여 TBM 굴진작업이 중단되는 사례가 없도록 배려하여야 한다.

본 현장에서 TBM 굴진장은 일평균 4.6m/일 최대 12m/일의 굴진을 보인바 있으나 산악터널에서는 버력반출이 원활히 된다면 본 공구와 같은 산암층에서는 200m/월의 시공이 가능하리라고 판단된다.간벽구간에서는 간벽의 응력집중현상이 발생되기 때문에 가급적 굴착시 간벽이 손상되지 않